

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION SYSTEM AND TECHNOLOGIES

УДК 004.588:625.03:616-009.1

DOI: 10.18413/2518-1092-2021-6-1-0-1

Ушаков Д.И.
 Камышникова Л.А.
 Алейников А.Ю.
 Павлова Ю.С.
 Рачинский С.А.
 Худасова О.Г.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РЕАБИЛИТАЦИИ ПОСТИНСУЛЬТНЫХ БОЛЬНЫХ

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
 Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

*e-mail: ushakov_d@bsu.edu.ru, kamyshnikova@bsu.edu.ru, aleinikov@bsu.edu.ru, pavlova_yus@bsu.edu.ru,
 rachinskiy@bsu.edu.ru, hudasova_og@bsu.edu.ru*

Аннотация

Использование аппаратно-программных технологий в медицине получила значительное развитие за последние два десятилетия благодаря таким достижениям, как экзоскелет и биоинженерия. Одним из методов восстановления функции верхних конечностей постинсультных пациентов является двигательная реабилитация при помощи роботизированных устройств, которые стали существенным дополнением к традиционной постинсультной реабилитации. В данном обзоре мы проанализировали современную литературу, посвященную аппаратно-программным комплексам с учетом их конструктивных особенностей для реабилитации верхних конечностей, чтобы в дальнейшем помочь разработчикам сделать верный выбор среди аппаратных компонентов и способствовать разработке и усовершенствованию робототехники для реабилитации рук у пациентов, перенесших инсульт. По нашему мнению, роботизированная реабилитация является одним из самых перспективных направлений реабилитации.

Ключевые слова: аппаратно-программный комплекс, экзоскелет, роботизированные устройства, реабилитация, инсульт.

Для цитирования: Ушаков Д.И., Камышникова Л.А., Алейников А.Ю., Павлова Ю.С., Рачинский С.А., Худасова О.Г. Аппаратно-программные технологии в реабилитации постинсультных больных // Научный результат. Информационные технологии. – Т.6, №1, 2021. – С. 3-12. DOI: 10.18413/2518-1092-2021-6-1-0-1

Ushakov D.I.
 Kamyshnikova L.A.
 Aleinikov A.Yu.
 Pavlova Yu.S.
 Rachinsky S.A.
 Khudasova O.G.

HARDWARE AND SOFTWARE TECHNOLOGIES IN REHABILITATION OF POST-STROKE PATIENTS

Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

*e-mail: ushakov_d@bsu.edu.ru, kamyshnikova@bsu.edu.ru, aleinikov@bsu.edu.ru, pavlova_yus@bsu.edu.ru,
 rachinskiy@bsu.edu.ru, hudasova_og@bsu.edu.ru*

Abstract

The use of hardware and software technologies in medicine has developed significantly over the past two decades thanks to such advances as the exoskeleton and bioengineering. One of the

methods for restoring the function of the upper extremities of post-stroke patients is motor rehabilitation with the help of robotic devices, which have become an essential addition to the traditional post-stroke rehabilitation. In this review, we examined the modern literature on hardware and software systems, taking into account their design features for upper limb rehabilitation, in order to further help developers make the right choice among hardware components and contribute to the development and improvement of robotics for hand rehabilitation in patients with stroke. In our opinion, robotic rehabilitation is one of the most promising areas of rehabilitation.

Keywords: hardware and software complex, exoskeleton, robotic devices, rehabilitation, stroke.

For citation: Ushakov D.I., Kamyshnikova L.A., Aleinikov A.Yu., Pavlova Yu.S., Rachinsky S.A., Khudasova O.G. Hardware and software technologies in rehabilitation of post-stroke patients // Research result. Information technologies. – Т.6, №1, 2021. – P. 3-12. DOI: 10.18413/2518-1092-2021-6-1-0-1

ВВЕДЕНИЕ

Аппаратно-программные технологии все чаще используются в медицине. Инсульт может привести к смерти или серьезному повреждению нервной системы и является основным фактором инвалидности [1]. Нарушение двигательных функций конечностей в значительной степени влияет на самообслуживание и качество жизни пациентов, что обеспечивает необходимость принятия всевозможных мер для восстановления моторики поврежденной конечности. Роботизированная терапия получила значительное развитие за последние два десятилетия благодаря достижениям в технологиях биомеханики и мехатроники, таких как экзоскелет и биоинженерия [2, 3, 15, 25]. Например, экзоскелет руки сконструированный А. Веге может технично и многократно двигать пальцами пациента, сопоставимо с действием врача, проводящего реабилитацию [23]. Кроме того, некоторыми роботами можно управлять с помощью собственного намерения пациента, извлеченного из биосигналов: сигналы электромиографии (ЭМГ) и электроэнцефалографии (ЭЭГ), что позволяет сформировать систему реабилитации с помощью роботизированных устройств [5]. Существующие обзоры робототехнических систем и аппаратно-программных комплексов для реабилитации рук при восстановлении моторики после инсульта не в полной мере информативны, для большинства исследований по применению роботизированной терапии. Аппаратная система в совокупности с программным обеспечением составляет основу функций специализированных робототехнических комплексов, однако полное понимание конструктивных особенностей способствует правильному выбору среди аппаратных компонентов и как следствие разработке и усовершенствованию робототехнических систем и аппаратно-программных комплексов для реабилитации рук у пациентов, перенесших инсульт.

Цель: провести анализ литературных источников по аппаратно-программным комплексам с учетом их конструктивных особенностей в реабилитации верхних конечностей у постинсультных больных, чтобы в дальнейшем помочь разработчикам сделать верный выбор среди аппаратных компонентов.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Аппаратная система в своем составе полностью определяет возможные типы движения, которые механическая часть может реализовывать с участием пациента, а также возможные сигналы, которые могут регистрироваться данной системой при взаимодействии с пациентом. Аппаратные системы как правило можно классифицировать по механической классификации: типы роботов, виды привода, типы соединений и виды датчиков (рис. 1).



Рис. 1. Механическая классификация роботов для реабилитации рук
Fig. 1. Mechanical classification of robots for hand rehabilitation

Типы роботов

Существующие роботы для реабилитации рук можно разделить на два основных типа в зависимости от расположения устройства и пользователя: концевой эффектор (находится вне тела пациента (рис.2а)) и экзоскелет (одевается на руку (рис. 2б)).

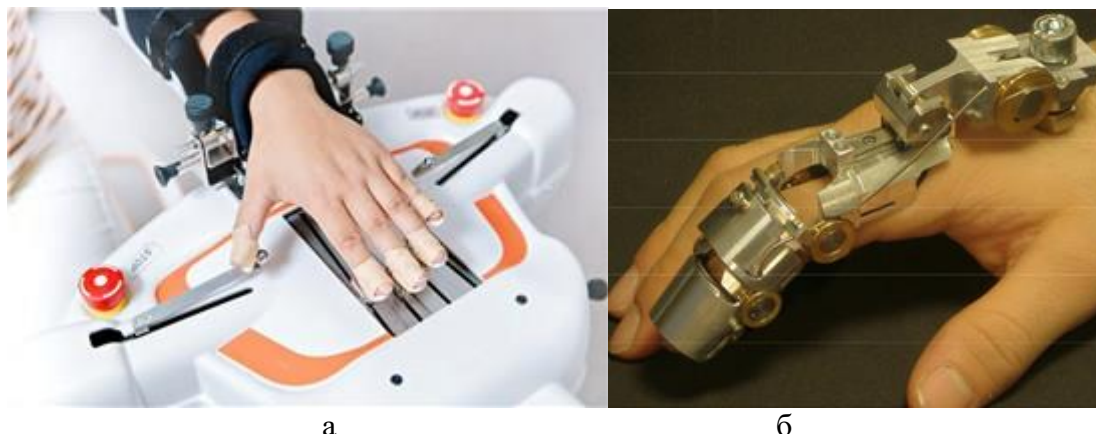


Рис. 2. Примеры различных типов роботов
Fig. 2. Examples of different types of robots

Концевой эффектор, находясь вне тела пациента, обеспечивает необходимое усилие на конце конечности пользователя, чтобы помочь или противостоять движению. Например, в роботизированной системе AMADEO (рис. 1а), после застегивания аппарат поддерживает кончики пальцев и можно выполнять сгибающие и растягивающие движения с помощью ползунка [16]. HandCARE – это еще один концевой эффектор, разработанный L. Dovat и др., в котором каждый палец прикреплен к инструментальной петле троса, позволяющей контролировать силу и линейное смещение [9]. Концевой эффектор обеспечивает силу без учета движений отдельных суставов пальцев пациента, что приводит к таким недостаткам, как ограниченный диапазон движений и проблемы с появлением мертвой точки. Кроме того, конечный эффектор не является мобильным из-за того, что он находится вне человеческого тела и имеет большой вес, что ограничивает его практическое использование вне медицинских учреждений.

В экзоскелете суставы и звенья робота имеют прямое соответствие с суставами руки человека. Робот для реабилитации рук разработанный X.L. Hu, имеет 2 степени свободы для каждого пальца [10]. А. Chiri с командой разработал экзоскелет HANDEXOS, который имеет малые габариты и легкий вес (рис. 2б) [8]. Такая портативность экзоскелета дает ему преимущество при постинсультной реабилитации, особенно для пациентов в более поздний период, когда они могут тренироваться дома [7]. В данной конструкции есть сложности, такие как оси роботов, которые должны быть выровнены с анатомическими осями руки. Разработка роботов

с мягким основанием решает проблему функциональной степени свободы и способствует широкому применению экзоскелета [17]. Команда Н. In спроектировали свои решения без сложных соединительных элементов. Они обладают сравнительно небольшим весом [11]. Сейчас роботы-экзоскелеты стали трендом в реабилитации рук после инсульта.

Виды приводов

Функция приводов заключается в преобразовании различных видов энергии для приведения в действие подвижных частей изделия. Имеется 5 основных видов приводов: электрический; гидравлический; пневматический; пневматический мускул; собственная мышца, активированная функциональной электрической стимуляцией.

Электродвигатели наиболее широко используемый привод в конструкции роботов для реабилитации рук, поскольку они доступны, надежны, просты в управлении и обладают высокой точностью. Разработанный А. Chiri HANDEXOS, приводится в действие силой, передаваемой от двигателя постоянного тока на тросы Боудена [8]. Робот-экзоскелет, разработанный Х.Л. Ну, приводится в действие линейным микродвигателем [10]. Общая производительность в преобразовании крутящего момента и скорости делают электродвигатель полезным в роботах для реабилитации рук, если требуется изменчивость в стратегиях управления [7]. Возможным недостатком электродвигателя является проблема безопасности в связи с жесткой конструкцией электродвигателя.

Пневматические приводы используются гораздо реже, чем электродвигатели в роботах для реабилитации рук. Примером использования такого привода может быть ASSIST, имеющий ряд преимуществ: низкая потребность в техническом обслуживании и возможность остановки под нагрузкой, не вызывая при этом повреждений [20]. Такие сложности, как шум, можно преодолеть за счет использования накопителя предварительно сжатого воздуха, но пока не решена проблема размера, поскольку необходима камера для накопления воздуха. Таким образом, пневматический привод можно использовать для систем с меньшей портативностью.

Пневматическая мышца, состоящая внутри из резиновой трубки с оболочкой, может надуваться или уменьшаться. Роботизированная система для реабилитации рук, производимая Kinetic Muscles Inc. (США), приводится в действие с помощью пневматического мускульного привода [13]. Недостатком пневматического привода является то, что исполнительные механизмы сложно контролировать из-за изменчивости во времени и нелинейности протекающих в них процессов.

Гидравлические приводы обладают хорошими характеристиками, например, имеется возможность создавать более высокий крутящий момент по сравнению с электрическими или пневматическими приводами, и они могут управляться с высокой точностью и частотой [24]. Но требуется больше пространства для размещения маслопроводящих трубопроводов, что ограничивает их использование.

Мышца человека на поврежденной руке может быть приводом в широком смысле, если она активирована с помощью функциональной электрической стимуляции по средствам робота. Rong W. и соавторы предложили роботизированную руку с электрической стимуляцией через перчатку робота, которые реализует лучшее восстановление функции руки за счет баланса электрической стимуляции и робота [19]. Исследователи часто соединяют электрическую стимуляцию с обработанными сигналами ЭМГ или ЭЭГ, которые сдерживают спонтанную моторику [23].

Существуют роботизированные системы для реабилитации рук, приводимые в действие симметричной конечностью, используемые в стратегии двустороннего обучения. А. Rahman и А. Jumaily разработали двусторонний синхронизированный ручной аппарат, в котором экзоскелет управлял поврежденной рукой по данным от перчатки, надетой на здоровую руку [18].

Типы соединений (трансмиссий)

Соединения в роботизированной системе должны быть легкие, удобные и хорошо управляться по заданной траектории. Проблема совпадения оси вращения может быть решена за счет использования поперечно-шарнирной конструкции или с помощью тросов.

Трос часто используется в качестве трансмиссии в роботах для реабилитации рук, включая трос шкива и трос Боудена. Шкиву требуется постоянное натяжение для поддержания сцепления с остальными шкивами, что ограничивает его использование [12]. Экзоскелет пальца, разработанный L. Dovat использует трос шкива [9]. Это устройство легко управляется силой, но не очень удобно в использовании. Трос Боудена является гибким и лучше для проведения, однако его недостатками являются переменная сила трения при изгибе. Робот, разработанный Wege и Zimmermann, использует трос Боудена для независимого управления движением пальцев [23]. Фактически, этот робот сочетает в себе и трос, и рычажную конструкцию. Тросы подобны мышцам руки, поэтому они могут быть эффективны для роботизированной системы реабилитации рук. Эту концепцию в основе имеет экзоскелет, разработанный командой H. In [11].

Датчики

Участие пациентов в системе реабилитации очень полезно с точки зрения эффективности таких процедур, поэтому роботизированная система реабилитации рук имеет ряд эффектов только в соответствии с концепцией непрерывного пассивного движения, что вызывает необходимость наличия датчиков и является принципиально важным моментом. Датчик считывает информацию от человека по принципу обратной связи или получает управляющие сигналы от человека или робота. По типам полученных сигналов датчики классифицируются на физические и биологические.

Датчики физических сигналов: сила, положение (или движение) наиболее часто используются в роботизированной системе реабилитации рук. Функция сигнала силы или положения характеризует физическое состояние руки, такое как прилагаемая сила движения или угол сгибания пальца. Р. Ben-Tzvi и Z. Ma разработали экзоскелет, с обратной связью и оптическим датчиком положения и тензодатчиками настроенными на получение сигнала силы рук и движения [6].

Датчики биологических сигналов: ЭЭГ или ЭМГ, тоже часто используются в роботизированной системе для реабилитации рук [5, 7]. Их функция состоит в том, чтобы отражать намерение человека двигаться, что может использоваться в качестве управляющих сигналов роботов. Сигналы ЭЭГ и ЭМГ являются наиболее важными сигналами, полученными от мозга или мышц.

Проблема оценивания программных технологий

Темпы разработки прототипов превосходят темпы клинического использования роботов для реабилитации рук, поэтому важно критически оценивать конструкцию тех или иных аппаратных решений для реабилитации рук. В большинстве исследований используется способ, который описывает характеристики конструкции, но совсем не дает клиническую оценку роботов [8, 9, 21]. В ряде исследований используется второй способ оценки конструкции, в котором приводятся несколько тестов по улучшению физических параметров роботов или производительности на определенных этапах. В них варьируются физические параметры: диапазон движения суставов, скорость движения и дополнительная сила, действующая на руки [6, 25]. Ряд исследователей используют третий способ, который дает оценку эффективности дизайна и сочетает в себе клинические методы, в частности улучшение по клинической шкале оценки Фугл-Мейера или журнал двигательной активности [16]. Способы оценивания программных технологий приведены в таблице.

Таблица

Оценивания аппаратно-программных технологий

Table

Assessment of hardware and software technologies

Устройство	Авторы, Исследование	Функциональные тесты	Клиническая шкала
AMADEO	Pinter et al. [16]	+	+
Handsome	Brokaw et al [25]	+	-
Handexos	Chiri et al. [8]	-	-

Устройство	Авторы, Исследование	Функциональные тесты	Клиническая шкала
MRI compatible robot	Tang et al. [21]	-	-
HandCARE	Dovat et al. [9]	-	-
SAFE	Ben-Tzvi et al. [6]	+	-
Hexosys I	Iqbal et al. [25]	-	-
Hexosys II	Iqbal et al. [25]	-	-
Handassist robot	Ueki et al. [25]	+	-

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как показывает классификация, в приведенных исследованиях изучались разные виды конструкции аппаратных систем для реабилитации рук. Функциональные возможности аппаратно-программных технологий можно оценивать по степени их соответствия разработанным требованиям по десятибалльной. Важно критически оценивать конструкцию тех или иных аппаратных решений для реабилитации рук. Для врачей и исследований важна клиническая оценка роботизированных систем. В большинстве исследований используется первый способ, который не дает клиническую оценку роботов, дизайн таких исследований неубедителен для пациентов или врачей. В ряде исследований используется второй способ оценки конструкции, в котором приводится несколько тестов по улучшению физических параметров роботов или производительности на определенных этапах. Немногие исследователи используют третий способ, который дает оценку эффективности дизайна, сочетающего в себе клинические методы, в частности улучшение по клинической шкале. Хотя многие независимые исследования показывают ряд успешных разработок, но в целом большинство реализаций имеют методологические недостатки, такие как отсутствие рандомизированных процедур и анализа всех методов лечения.

Решение методологических недостатков может состоять в том, что следует разработать стандартные рандомизированные контролируемые испытания (РКИ) по оценке существующих роботизированных систем реабилитации рук. Подход с использованием клинической шкалы, которую легко применять для оценки, должен быть популяризирован среди разработчиков роботов для реабилитации рук. С другой стороны, установка других стандартизованных методов оценки, реализуемых с большим количеством целей с помощью роботов, может быть многообещающим, поскольку это преодолевает большой недостаток клинической шкалы – субъективность визуальных оценок теста [21]. Измерения робота, можно использовать как оценку конструкции робота, так и оценку степени реабилитации [21]. Отсутствие индивидуальных настроек – еще один недостаток, поскольку двигательные нарушения у пациентов варьируются в зависимости от сложности последствий инсульта [16].

Функция определенного робота по реабилитации рук часто может быть реализована в нескольких разных комбинациях оборудования. Это повышает эффективность аппаратной системы, по сравнению с отдельным специализированным роботом, поскольку делает выбор оборудования не просто поиском подходящего оборудования, а обменом различными компонентами под конкретную потребность приложения. Роботы-экзоскелеты являются доминирующим выбором, по сравнению с роботами с концевыми эффекторами в соответствии с тенденцией лечения на дому. Хотя у концевых эффекторов есть преимущество, поскольку устраняется проблема несовпадения соединений робота и суставов, это также может быть реализовано с помощью роботов-экзоскелетов без соединений, основанных на понятии функциональной степени свободы. Выбор привода в основном осуществляется между электродвигателем и пневматической искусственной мышцей. Такие достоинства, как простота управления, высокая точность и высокая удельная энергия, делают электродвигатель одним из основных средств активации роботов для реабилитации рук. Портативность и небольшой объем крайне важны для создания гибкой руки робота, поэтому развитие роботов с мягким корпусом, использующие пневматические искусственные мышцы, могут быть компактными и безопасными, по сравнению с традиционными приводами, в то время как применение роботов с мягким телом для реабилитации рук все еще

ограничено дополнительным резервуаром для хранения сжатого воздуха. При выборе действий следует уделять больше внимания мышцам контралатеральной конечности человека. Зеркальная терапия, уже получила хорошие результаты на практике в традиционной терапии и в нескольких приложениях в роботизированной терапии [14]. Текущие исследования роботов для реабилитации рук реализуют зеркальную терапию косвенным методом с помощью приводов, управляемых сигналом от информационной перчатки. Для большей эффективности реабилитации необходимы дальнейшие исследования по изучению новых способов обработки информации от рук и роботов. Хотя конструкция мягкого тела имеет преимущество, в том, что она адаптируется к человеческому телу, сложность системы управления ограничивают ее применение. Следует отметить, что роботы без соединений, разработанные Н. In с использованием троса дает новые возможности использования для решения проблемы движения [20]. Еще одна тенденция при создании аппаратных комплексов для реабилитации рук это широкое использование датчиков биоэлектрического сигнала. Хотя датчик не является необходимым для функционирования устройства, многие исследователи считают важным участие пациента и это требует наличия специализированных датчиков получения сигнала от человека [4, 22]. Даже если пациенты не могут двигать руками, биоэлектрический сигнал можно использовать вместо физического сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная робототехника для реабилитации рук представлена в соответствии с классификацией аппаратной системы. Обзор робототехники дает общее представление о взаимосвязи между роботом и человеком, аппаратными средствами для реабилитации рук и их клинической оценкой. Важно критически оценивать конструкцию тех или иных аппаратных решений для реабилитации рук. Следует разработать стандартные РКИ по оценке существующих роботизированных систем реабилитации рук, с использованием клинических шкал реабилитации для выявления более эффективных роботизированных систем.

По нашему мнению, роботизированная реабилитация является одним из перспективных направлений в области восстановления двигательных функций конечностей после перенесенного пациентом инсульта. Разработка и усовершенствование аппаратно-программных комплексов реабилитации, особенно отечественного производства, позволит повысить качество реабилитации пациентов, уменьшая при этом затраты времени врача на ее проведение.

Список литературы

1. Здравоохранение в России. 2019: Статистический сборник. – М., 2019; URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Zdravoohran-2019.pdf>. (дата обращения: 12.01.2021).
2. Ситникова М.А., Афонин А.Н., Алейников А.Ю., Гладышев А.Р., Попова А.В. Использование мобильного робота для интерактивного обучения счету с помощью числовой линии // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 5; URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41510> (дата обращения: 13.06.2017).
3. Фролов А.А., Козловская И.Б., Бирюкова Е.В., Бобров П.Д. Роботизированные устройства в реабилитации после инсульта // Журнал высшей нервной деятельности им.И.П.Павлова. 2017. – № 4. – С. 394-413. doi:10.7868/s004446771704-0017.
4. Ушаков Д.И. О возможности повышения устойчивости сигналов с OFDM на воздействие джиттера несущей частоты // Информационные системы и технологии. – 2014. – № 4(84). – С. 118-125.
5. Barsotti M., Leonardi D., Loconsole C., Solazzi M. A full upper limb robotic exoskeleton for reaching and grasping rehabilitation triggered by MI-BCI // International Conference on Rehabilitation Robotics, Singapore, Singapore, August 2015.
6. Ben-Tzvi P., Ma Z. Sensing and force-feedback exoskeleton (SAFE) robotic glove // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2015. – Vol. 23. – № 6. – P. 992-1002.
7. Bos R.A., Haarman C.J.W., Stortelder T. A structured overview of trends and technologies used in dynamic hand orthoses // Journal of Neuroengineering and Rehabilitation. – 2016. – Vol. 13. – № 1. – P. 1-25.
8. Chiri A., Giovacchini F., Vitiello N. et al. HANDEXOS: towards an exoskeleton device for the rehabilitation of the hand // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2009. – P. 1106-1111.

9. Dovat L., O. Lambercy, R. Gassert et al. HandCare: a cable-actuated rehabilitation system to train hand function after stroke // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. – 2008. – Vol. 16. – № 6. – P. 582.
10. Hu X.L., Tong K.Y., Wei X.J., Rong W., Susanto E.A., Ho S.K. Coordinated upper limb training assisted with an electromyography (EMG)-driven hand robot after stroke // *Conference Proceedings: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. – 2013. – Vol. 2013 – P. 5903-5906.
11. In H.K, Cho K.J., Kim K., Lee B. Jointless structure and under-actuation mechanism for compact hand exoskeleton // *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*. 2011. – Vol. 2011. – Article 5975394.
12. In H.K., Cho K.J. Evaluation of the antagonistic tendon driven system for SNU Exo-Glove // *International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*. – 2013. – Vol. 60. – P. 507-509.
13. Kinetic Muscles Inc. Hand physical therapy with the HandMentor™. – 2017. URL: <http://www.kineticmuscles.com/hand-physicaltherapy-hand-mentor.html> (date of access:12.01.2021).
14. Koumpouros Y. A systematic review on existing measures for the subjective assessment of rehabilitation and assistive robot devices // *Journal of Healthcare Engineering*. – 2016. –Vol. 2016. – №. 4. – P. 171.
15. Narayan J., Kalita B., Dwivedy S.K. Development of Robot-Based Upper Limb Devices for Rehabilitation Purposes: a Systematic Review // *Augment Hum Res*. 6. – 2021. – 4. URL: <https://doi.org/10.1007/s41133-020-00043-x> (date of access:12.01.2021).
16. Pinter D., Pegritz S., Pargfrieder C. et al. Exploratory study on the effects of a robotic hand rehabilitation device on changes in grip strength and brain activity after stroke // *Topics in Stroke Rehabilitation*. – 2013. –Vol. 20. – №. 4. – P. 308.
17. Polygerinos P., Wang Z., Galloway K.C., Wood R.J., Walsh C.J. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2014. – Vol. 73. – P. 135-143.
18. Rahman A., Al-Jumaily A. Design and development of a bilateral therapeutic hand device for stroke rehabilitation // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2013. – Vol. 10. – № 12. – P. 405.
19. Rong W., Tong K.Y., Hu X.L., Ho N.S.K. Combined electromyography (EMG)-driven robotic system with functional electrical stimulation (FES) for rehabilitation // *Northeast Bioengineering Conference*. – 2012. – Vol. 10. –P. 313-314.
20. Sasaki D., Noritsugu T., Takaiwa M. Development of active support splint driven by pneumatic soft actuator (ASSIST) // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. – 2006. – P. 520–525.
21. Tang Z.J., Sugano S., Iwata H. Design of an MRI compatible robot for finger rehabilitation // *International Conference on Mechatronics and Automation*. – 2012. – P. 611-616.
22. Ushakov D.I., Starovoit I.A. On a method of formation of signals with high spectral efficiency for cognitive radio communication system // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2015. – Vol. 80. – № 3. – P. 409-418.
23. Wege A., Zimmermann A. Electromyography sensor based control for a hand exoskeleton // *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. – 2007. – P. 1470-1475.
24. Whitney J.P., Glisson M.F., Brockmeyer E.L., Hodgins J.K. A low-friction passive fluid transmission and fluid-tendon soft actuator // *IEEE/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems*. – 2014. – P. 2801-2808.
25. Yue Z., Zhang X., Wang J. Hand Rehabilitation Robotics on Poststroke Motor Recovery // *Behavioural Neurology*. – 2017. – Vol. 2017. URL: <https://doi.org/10.1155/2017/3908135> (date of access:12.01.2021).

References

1. Health care in Russia 2019: Stat.sb. / Rosstat. – M., 2019. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Zdravooхран-2019.pdf>. (date of access:12.01.2021).
2. Sitnikova M.A., Afonin A.N., Aleinikov A.Yu., Gladyshev A.R., Popova A.V. Using a mobile robot for interactive learning to count using a number line // *Fundamental Research*. – 2017. – No. 5; URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41510> (date of access: 13.06.2017).
3. Frolov A.A., Kozlovskaya I.B., Biryukova E.V., Bobrov P.D. Robotic devices in poststroke rehabilitation // *Journal of Higher Nervous Activity I.P. Pavlov*. – 2017. – No 4. – P. 394-413.
4. Ushakov D.I. On the possibility of increasing the stability of signals with OFDM on the effect of carrier frequency jitter // *Information systems and technologies*. – 2014. – No 4(84). – P. 118-125.

5. Barsotti M., Leonardis D., Loconsole C., Solazzi M. A full upper limb robotic exoskeleton for reaching and grasping rehabilitation triggered by MI-BCI // International Conference on Rehabilitation Robotics, Singapore, Singapore, August 2015.
6. Ben-Tzvi P., Ma Z. Sensing and force-feedback exoskeleton (SAFE) robotic glove // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2015. – Vol. 23. – № 6. – P. 992-1002.
7. Bos R.A., Haarman C.J.W., Stortelder T. A structured overview of trends and technologies used in dynamic hand orthoses // Journal of Neuroengineering and Rehabilitation. – 2016. – Vol. 13. – № 1. – P. 1-25.
8. Chiri A., Giovacchini F., Vitiello N. et al. HANDEXOS: towards an exoskeleton device for the rehabilitation of the hand // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2009. – P. 1106-1111.
9. Dovat L., O. Lamercy, R. Gassert et al. HandCare: a cable-actuated rehabilitation system to train hand function after stroke // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2008. – Vol. 16. – No 6. – P. 582.
10. Hu X.L., Tong K.Y., Wei X.J., Rong W., Susanto E.A., Ho S.K. Coordinated upper limb training assisted with an electromyography (EMG)-driven hand robot after stroke // Conference Proceedings: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. – 2013. – Vol. 2013 – P. 5903-5906.
11. In H.K., Cho K.J., Kim K., Lee B. Jointless structure and under-actuation mechanism for compact hand exoskeleton // IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. 2011. – Vol. 2011. – Article 5975394.
12. In H.K., Cho K.J. Evaluation of the antagonistic tendon driven system for SNU Exo-Glove // International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence. – 2013. – Vol. 60. – P. 507-509.
13. Kinetic Muscles Inc. Hand physical therapy with the HandMentor™. – 2017. URL: <http://www.kineticmuscles.com/hand-physicaltherapy-hand-mentor.html> (date of access: 12.01.2021).
14. Koumpouros Y. A systematic review on existing measures for the subjective assessment of rehabilitation and assistive robot devices // Journal of Healthcare Engineering. – 2016. – Vol. 2016. – No 4. – P. 171.
15. Narayan J., Kalita B., Dwivedy S.K. Development of Robot-Based Upper Limb Devices for Rehabilitation Purposes: a Systematic Review // Augment Hum Res. 6. – 2021. – 4. URL: <https://doi.org/10.1007/s41133-020-00043-x> (date of access: 12.01.2021).
16. Pinter D., Pegritz S., Pargfrieder C. et al. Exploratory study on the effects of a robotic hand rehabilitation device on changes in grip strength and brain activity after stroke // Topics in Stroke Rehabilitation. – 2013. – Vol. 20. – № 4. – P. 308.
17. Polygerinos P., Wang Z., Galloway K.C., Wood R.J., Walsh C.J. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation // Robotics and Autonomous Systems. – 2014. – Vol. 73. – P. 135-143.
18. Rahman A., Al-Jumaily A. Design and development of a bilateral therapeutic hand device for stroke rehabilitation // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2013. – Vol. 10. – № 12. – P. 405.
19. Rong W., Tong K.Y., Hu X.L., Ho N.S.K. Combined electromyography (EMG)-driven robotic system with functional electrical stimulation (FES) for rehabilitation // Northeast Bioengineering Conference. – 2012. – Vol. 10. – P. 313-314.
20. Sasaki D., Noritsugu T., Takaiwa M. Development of active support splint driven by pneumatic soft actuator (ASSIST) // IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2006. – P. 520-525.
21. Tang Z.J., Sugano S., Iwata H. Design of an MRI compatible robot for finger rehabilitation // International Conference on Mechatronics and Automation. – 2012. – P. 611-616.
22. Ushakov D.I., Starovoi I.A. On a method of formation of signals with high spectral efficiency for cognitive radio communication system // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2015. – Vol. 80. – No 3. – P. 409-418.
23. Wege A., Zimmermann A. Electromyography sensor based control for a hand exoskeleton // IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. – 2007. – P. 1470-1475.
24. Whitney J.P., Glisson M.F., Brockmeyer E.L., Hodgins J.K. A low-friction passive fluid transmission and fluid-tendon soft actuator // IEEE/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2014. – P. 2801-2808.
25. Yue Z., Zhang X., Wang J. Hand Rehabilitation Robotics on Poststroke Motor Recovery // Behavioural Neurology. – 2017. – Vol. 2017. URL: <https://doi.org/10.1155/2017/3908135> (date of access: 12.01.2021).

Ушаков Дмитрий Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий

Камышникова Людмила Александровна, кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры факультетской терапии

Алейников Андрей Юрьевич, старший преподаватель кафедры информационных и робототехнических систем, руководитель студенческого конструкторского бюро

Павлова Юлия Станиславовна, ассистент кафедры факультетской терапии.

Рачинский Сергей Андреевич, старший преподаватель информационно-телекоммуникационных систем и технологий

Худасова Ольга Геннадьевна, старший преподаватель кафедры информационных и робототехнических систем

Ushakov Dmitry Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies

Kamyshnikova Lyudmila Aleksandrovna, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Faculty Therapy

Alenikov Andrey Yurievich, Senior Lecturer of Department of Information and Robotic Systems, Head of the Student Design Bureau

Pavlova Yulia Stanislavovna, Assistant, Department of Faculty Therapy

Rachinsky Sergey Andreevich, senior lecturer of information and telecommunication systems and technologies

Khudasova Olga Gennad'yevna, Senior Lecturer of the Department of Information and Robotic Systems